

学校编码: 10384

密级\_\_\_\_\_

学号: 22320131151435

厦门大学

硕士学位论文

渤海全新世甲藻孢囊及其环境意义研究

Study on dinoflagellate cysts of Holocene and their  
environmental significance in Bohai Sea

郝赛赛

指导教师姓名: 李超副教授  
专 业 名 称: 海 洋 地 质  
论文提交日期: 2016 年 05 月  
论文答辩时间: 2016 年 05 月

2016年05月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于        年    月    日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年    月    日

## 摘要

甲藻是一种非常古老的真核生物,许多甲藻能产生休眠孢囊。沉积物中的甲藻休眠孢囊对反映海水温度、盐度、营养盐及海平面变化等环境因子具有非常重要的意义,其还可以揭示赤潮发生的潜能。渤海是我国半封闭的内海,受地形地貌、气候、海洋水文及人类活动影响较为显著。本文对渤海表层及柱状沉积物中的甲藻孢囊进行研究,表层样结合现代数理统计软件细致地分析了甲藻孢囊的种类组成、分布特征及与环境因子的关系。柱状样结合地层年代通过优势种在各层位的含量变化,探讨了渤海近 8000 aBP 年以来海水的温度、盐度、营养盐及海平面变化等海洋环境的变迁,为该研究区海洋环境的演化提供背景资料。本研究的主要结论和认识如下:

(1) 表层沉积物中共鉴定甲藻孢囊 13 属 43 种(包括 2 种不定类型),微小亚历山大藻(*Alexandrium minutum*)、具刺膝沟藻(*Gonyaulax spinifera*)、多边舌甲藻(*Lingulodinium polyedrum*)、多沟藻未定种(*Polykrikos* sp.)为优势种。调查区甲藻孢囊的生态习性非常复杂,既有近岸广布种,也有暖水冷水种,还有与水体营养盐相关的高营养盐属种的分布。甲藻孢囊的丰度为 153~3653 粒/克,有由南向北逐渐增加的趋势。综合分析甲藻孢囊的丰度、异养型甲藻孢囊的丰度及自养型甲藻孢囊的丰度反映出该海域富营养化的海洋环境。

(2) 通过聚类分析和主成分分析,各组合站位甲藻孢囊的分布整体上受渤海低盐度、较高营养盐的影响,这与入海河流的冲淡及携带的陆源物质有关。渤海的温度梯度变化不大,都有暖水种的存在,但也有受黄海暖流余脉影响从外海带入的热带~亚热带种。水深主要通过沉积物粒径反映其水动力情况,影响水体中甲藻孢囊的沉积。局部海域富营养化程度较为严重。甲藻孢囊的分布特征总体反映出渤海既受内陆影响,又与外海有联系。

(3) B42 柱状沉积物中共鉴定甲藻孢囊 12 属 41 种(包括 2 种未定类型),除海州原多甲藻(*Protoperidinium haizhouense*)和斯氏扁甲藻(*Pyrophacus steinii*)外,属种类型与表层样中鉴定的一致。其中,优势种为具刺膝沟藻、膝沟藻未定种(*Gonyaulax* sp.)、网状原角管藻(*Protoceratium reticulatum*)、多边舌甲藻。甲藻孢

囊丰度范围在 31~1247 粒/克，受沉积物平均粒径的影响较大。

(4) B42 柱状样优势种的环境指示意义：

膝沟藻组合及网状原角管藻的变化表明在约 8000~6400 aBP 海水温度较高，约 6400~4400 aBP 海水温度略有增加，约 4400 aBP 至今，海水温度受黄海暖流余脉的影响更明显，表现出复杂的海水温度变化。

甲藻孢囊丰度的波动与海平面的波动较一致，海平面升高，甲藻孢囊的丰度也会相应增加。

多边舌甲藻的含量相对稳定，粗略推测其盐度变化不大，但很难用单一的多边舌甲藻含量变化解释渤海盐度的具体变化情况。

甲藻孢囊的丰度、异养型甲藻孢囊的丰度及自养型甲藻孢囊的丰度反映渤海海约 8000 aBP 以来处于正常的营养盐状态。具刺膝沟藻、多边舌甲藻、异养原多甲藻反映出在约 8000~4400 aBP 渤海营养物质主要来源于河流陆源输入和海平面上升入侵渤海，约 4400 aBP 至今以陆源输入为主，但该阶段气候转冷，陆源输入减弱。

**关键字：**甲藻孢囊；全新世；渤海；环境

## Abstract

Dinoflagellates are very ancient eukaryotes, many dinoflagellates can produce resting cysts. Dinoflagellate cysts in sediments have Significant meaning on reflecting the seawater temperature, salinity, nutrients, sea-level and other environmental factors, which have the potential to reveal occurrence of red tide. The Bohai Sea is a semi-enclosed coastal sea which obviously impacted by the topography, climate, hydrology and human activities. Therefore, dinoflagellate cysts from surface and core sediments were identified in this paper, the relationship between the dinoflagellates cysts composition, distribution and environmental factors were detailed analyzed with mathematical statistics softwares. Combining the chronological age with sample column, through the analysis of content variation of dominant species, the change of the marine environment in seawater temperature, salinity, nutrients and sea level since 8000 aBP in the Bohai Sea were discussed in this paper. It can provide background information of the marine environmental evolution in Bohai Sea area. The main conclusions in the paper are as follows:

(1) Through the analysis of the surface sediments collected from 24 stations, 13 genus and 43 species (including two unidentified species) cysts were identified, of which the dominant group were *Alexandrium minutum*, *Gonyaulax spinifera*, *Lingulodinium polyedrum*, *Polykrikos* sp.. In dinoflagellate cysts community, ecological habits were very complicated, neritic species and widespread species, warm water species and cold water species, and high nutrient species were distributed. The cyst abundance varied from 153 to 3653 cysts per gram (dry weight), which gradually increased from south to north. The result of abundance of dinoflagellate cysts, autotrophic abundance of dinoflagellate cysts and heterotrophic abundance of dinoflagellate cysts suggested nutrient-rich waters.

(2) Through the Cluster Analysis and Principal Component Analysis of main genus-species, the distribution of dinoflagellate cysts at each station was overall affected by low salinity and high nutritive salt content which was connected with seagoing waters' discharging and terrigenous matters. The temperature gradient across

the Bohai Sea was not obvious which was beneficial to the presence of warm water species. Tropical-subtropical water species carried by the Yellow Sea warm current extension also exist. Water depth mainly reflected the hydrodynamic conditions through the grain size of sediment which can impact dinoflagellates deposition. Eutrophication degree in some waters were high. Characteristics of dinoflagellate cysts distribution indicated that Bohai Sea was not only affected by inland but also connected with the open water.

(3) According to the analysis of the core sediments, 12 genus and 41 species (including unidentified species) cysts were identified. Besides *Pyrophacus steinii* and *Protoperidinium haizhouense*, species identified were same with surface sediment. The dominant group was *Gonyaulax spinifera*, *Gonyaulax* sp., *Protoceratium reticulatum* and *Lingulodinium polyedrum*. The cyst abundance varied from 31 to 1247 cysts per gram (dry weight). The distribution of dinoflagellate cysts abundance were impacted by sediment granularity.

(4) Dinoflagellate cysts as indicators of environment in B42 core:

The group of *Gonyaulax* spp. and *Protoceratium reticulatum* indicated variation of seawater temperature. Seawater temperature was higher in 8000~6400 aBP. In 6400~4400 aBP, Seawater temperature was increased slightly. Since 4400 aBP, it affected by the increased of warm current of the Yellow Sea, variation of seawater temperature was more complicated.

The fluctuations of dinoflagellate cysts abundance were nearly consistent with the sea-level: when the sea-level rised the abundance of dinoflagellate cysts increased correspondly.

Wave motion of *Lingulodinium polyedrum* was small in total, which illustrated that the variation of salinity was small. But it was hard to record the special variation of sea salinity using the single content of *Lingulodinium polyedrum*.

The abundance of dinoflagellate cysts, heterotrophic dinoflagellate cysts and autotrophic dinoflagellate cysts indicated that nutritive salt was in a normal state since 8000 aBP. *Gonyaulax spinifera*, *Lingulodinium polyedrum* and heterotrophic

*Protoperidinium* indicated the source of nutritive salt in Bohai sea: In 8000~4400 aBP, affected by input of fluvial terrigenous matter and invasion caused by increase of sea-level. Since 4400 aBP, terrigenous matter was main, but due to the cooling climate in this phase, errigenous matter was subdued.

**Key words:** Dinoflagellate cysts; Holocene; Bohai Sea; Environment



# 目 录

摘要 .....	I
第一章 绪论 .....	1
1.1 课题来源 .....	1
1.2 选题依据与研究意义 .....	1
1.3 研究内容 .....	2
1.4 研究现状 .....	3
1.4.1 甲藻孢囊的概念及早期研究历史 .....	3
1.4.2 甲藻孢囊形态分类的研究现状 .....	3
1.4.3 甲藻孢囊的空间分布研究现状 .....	4
1.4.4 甲藻孢囊与赤潮的研究现状 .....	5
1.4.5 研究区研究现状及不足 .....	6
第二章 研究区概况 .....	7
2.1 区域自然地理概况 .....	7
2.2 区域地质构造 .....	7
2.3 水深地形 .....	8
2.4 海洋水文 .....	9
2.5 黄河改道与海平面变化 .....	10
第三章 材料与方法 .....	12
3.1 研究材料 .....	12
3.1.1 采样站位 .....	12
3.1.2 样品的采集 .....	14
3.2 样品的处理与分析 .....	14
3.2.1 甲藻孢囊样品的处理 .....	14
3.2.2 甲藻孢囊的鉴定分析 .....	15
3.2.3 优势种的确定 .....	16
3.2.4 沉积物粒度分析方法 .....	16
3.2.5 沉积速率与年代的估算 .....	17
3.3 数据分析 .....	20
3.3.1 聚类分析 .....	20
3.3.2 主成分分析 .....	20
3.4 相关软件 .....	20
第四章 表层沉积物中甲藻孢囊分布特征及其环境意义 .....	21
4.1 表层沉积物中甲藻孢囊的分布特征 .....	21
4.1.1 甲藻孢囊的组成及分布特征 .....	21
4.1.2 甲藻孢囊的丰度特征 .....	35
4.2 甲藻孢囊的组合与环境控制因素的探讨 .....	41

4.3 前人对水体中甲藻的研究与沉积物中甲藻孢囊对比 .....	49
4.4 渤海甲藻孢囊与赤潮 .....	49
4.5 与中国沿海甲藻孢囊的对比 .....	51
4.6 小结 .....	52
<b>第五章 B42 柱状样中甲藻孢囊的分布特征及其环境意义 .....</b>	<b>54</b>
5.1 B42 柱状样的沉积环境 .....	54
5.2 柱状沉积物中的甲藻孢囊的分布特征 .....	56
5.2.1 甲藻孢囊的组成及变化特征 .....	56
5.2.2 沉积物中甲藻孢囊的丰度 .....	58
5.3 柱状沉积物中甲藻孢囊的特征及其环境的意义 .....	59
5.3.1 膝沟藻组合及网状原角管藻指示渤海海水温度变化特征 .....	60
5.3.2 甲藻孢囊的丰度指示渤海海平面变化特征 .....	62
5.3.3 多边舌甲藻指示的渤海盐度变化特征 .....	63
5.3.4 甲藻孢囊丰度及优势种指示渤海营养盐的变化特征 .....	64
5.4 小结 .....	66
<b>第六章 结论与展望 .....</b>	<b>68</b>
6.1 结论 .....	68
6.2 本文的新颖点 .....	69
6.3 存在的不足之处及展望 .....	69
<b>参考文献 .....</b>	<b>71</b>
<b>附表 .....</b>	<b>83</b>
<b>图版 .....</b>	<b>96</b>
<b>研究生期间参加的课题 .....</b>	<b>100</b>
<b>致谢 .....</b>	<b>101</b>

## Contents

<b>Abstract .....</b>	<b>I</b>
<b>Chapter 1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
1.1 The source of topics.....	1
1.2 Foundations of selecting topic and its studying purpose.....	1
1.3 Research progress .....	2
1.4 Main contents of present studies .....	3
1.4.1 The dinoflagellate cysts and its research history.....	3
1.4.2 Morphological classification .....	3
1.4.3 Spatial distribution .....	4
1.4.4 Correlation among dinoflagellate cysts and red tide .....	5
1.4.5 Problems and present study in Bohai Sea.....	6
<b>Chapter 2 General Situation of Survey Area.....</b>	<b>7</b>
2.1 Physical geography of survey area .....	7
2.2 Tectonic about survey area.....	7
2.3 Water depth and topography .....	8
2.4 Hydrology conditions about survey area .....	9
2.5 Correlation among relative the change of sea-level and the transition of Yellow River.....	10
<b>Chapter 3 Materials and Methods .....</b>	<b>12</b>
3.1 Materials .....	12
3.1.1 Stations .....	12
3.1.2 Collecting samples.....	14
3.2 Dinoflagellate cysts identification.....	14
3.2.1 Treated methods .....	14
3.2.2 Identification and analysis of dinoflagellate cysts.....	15
3.2.3 Defination of the dominant species.....	16
3.2.4 Analytical method of sediment granularity .....	16

3.2.5 Estimate depositional rate and age.....	17
3.3 Data analysis.....	20
3.3.1 Cluster Analysis.....	20
3.3.2 Principal Component Analysis.....	20
3.4 Related software.....	20
<b>Chapter 4 Distribution of dinoflagellate cysts in surface sediment and their environment significance..</b>	<b>21</b>
4.1 Distribution of dinoflagellate cysts in surface sediments .....	21
4.1.1 Combination and distribution of dinoflagellate cysts.....	21
4.1.2 Abundance of dinoflagellate cysts in surface sediments.....	35
4.2 Discussed assemble of dinoflagellate cysts with environmental factors...	41
4.3 A comparison of water algae research and sediments dinoflagellate cysts by previous.....	49
4.4 Correlation among dinoflagellate cysts and red tide in Bohai Sea.....	51
4.5 Comparison with China coastal dinoflagellate cysts .....	52
4.6 Conclusions .....	54
<b>Chapter 5 Dinoflagellate cysts distribution in B42 core and their environment significance.....</b>	<b>54</b>
5.1 Depositional environment in B42 Core .....	54
5.2 Dinoflagellate cysts distribution in B42 core .....	56
5.2.1 Composition and variation of dinoflagellate cysts in B42core.....	56
5.2.2 Abundance of dinoflagellate cysts.....	58
5.3 Dinoflagellate cysts distribution in core and their environment significance.....	59
5.3.1 Combination of <i>Gonyaulax</i> spp., <i>Protoceratium reticulatum</i> indicated the variation of temperature in B42 Core.....	60
5.3.2 Abundance of dinoflagellate cysts indicated the variation of relative sea-level in B42 Core.....	62

5.3.3 <i>Lingulodinium polyedrum</i> indicate the variation of salinity in B42 Core.....	63
5.3.4 Abundance of dinoflagellate cysts and dominant species indicated the variation of nutrients in B42 Core.....	64
5.4 Conclusions .....	66
<b>Chapter 6 Conclusions and Prospect.....</b>	<b>68</b>
6.1 Conclusions .....	68
6.2 Main innovative of the research .....	69
6.3 Problems need to be further studied .....	70
<b>References.....</b>	<b>71</b>
<b>Appendix .....</b>	<b>83</b>
<b>Plates .....</b>	<b>96</b>
<b>Research projects.....</b>	<b>100</b>
<b>Acknowledgements .....</b>	<b>101</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 课题来源

论文工作依托国家自然科学基金项目“中国近海原多甲藻科的分类和系统发育研究（41376170）”来开展渤海全新世甲藻孢囊组合及其环境意义的研究。

### 1.2 选题依据与研究意义

甲藻是一种非常古老的真核生物，其数量仅次于硅藻，有很强的适应能力，许多甲藻能产生休眠孢囊<sup>[1]</sup>。休眠期间，沉降到海底的孢囊可以被运送到水流运动缓慢的细砂、泥质等沉积物中，扩大了甲藻的地理分布<sup>[1]</sup>。甲藻孢囊只有在度过休眠期后，在具备适宜的环境条件（通常为光照、氧气和合适的温度）时才能萌发，形成浮游细胞重新回到水体中，并可随水流迁移到别处<sup>[2-3]</sup>。某一层次沉积物中的甲藻孢囊是一段时期内所沉积的孢囊集合，且大多数甲藻孢囊具有含孢粉类似物的抗性细胞壁，可长期保存在沉积物中。因此，它在一定程度上能较完整地反映当时水体中甲藻种群的组成特征。这对确定当时表层海水的温度、盐度、营养盐及海平面变化等环境因素具有非常重要的意义，而且还可以揭示赤潮发生的潜能<sup>[4-5]</sup>。

渤海是新生代隆起与拗陷运动形成的沉降盆地，第四纪地层广泛发育<sup>[6]</sup>。渤海也是气候波动较频繁的地区，气候的变化也将记录在沉积物中<sup>[7]</sup>。在海洋环境变化的每一历史时期，沉积物中对应不同的甲藻孢囊组合，将揭示当时的海洋环境，有利于古海洋环境的重建。

随着经济的发展，人们对沿海海洋资源的开发利用频繁，海洋污染也随之加重。渤海是我国半封闭的内海，自我净化能力较差，发生赤潮的次数很多<sup>[8]</sup>。近年来，沿海多国开展甲藻孢囊分类学<sup>[9]</sup>、生长条件<sup>[10]</sup>、形成机制<sup>[11]</sup>、有害赤潮的预测<sup>[12-14]</sup>等方面的工作，积累了丰富的资料。我国已有对南海<sup>[15-22]</sup>、东海<sup>[23]</sup>、黄海<sup>[24-25]</sup>甲藻孢囊研究的报道，但对渤海的研究报道相对较少。对渤海甲藻孢囊的研究主要有以下几方面的意义：

（1）研究渤海表层沉积物中甲藻孢囊的种群组成、分布特征及其与环境因素

的关系。还可以揭示赤潮发生的潜能，以采取有效手段预防与治理。

近年来随着城市化、工业化和海水养殖的发展，渤海水体中氮、磷含量增加，出现富营养化现象。通过对渤海甲藻孢囊的属种及分布特征研究，可以很好地了解该海域的海洋环境。另外，对赤潮进行预测，减少赤潮给人民生命和财产带来的威胁和损失。

(2) 研究柱状沉积物中甲藻孢囊的种群组成及重要属种的变化特征，从百年尺度上探讨古海洋环境的变迁。

利用甲藻孢囊对环境的敏感性及其在沉积物中长期保存的特性，结合地层年代研究其属种组成在每一层位的变化，可以很好地反映当时的环境特点。

(3) 研究渤海甲藻孢囊的水平和垂直生态地理分布，以期为今后深入开展渤海甲藻孢囊研究及古海洋环境的重建研究提供重要的背景资料。

渤海是中国近海浮游植物群落研究资料较为丰富和系统的海区，但对沉积物中甲藻孢囊的研究较南海、东海及黄海还比较少且很不系统，有必要对渤海的甲藻孢囊进行研究。

### 1.3 研究内容

本文研究渤海表层及柱状沉积物中甲藻孢囊的属种组成、分布特征及其变化，揭示渤海现在和过去的环境特点。主要研究内容包括以下几个方面：

#### (1) 渤海甲藻孢囊属种组成及其分布特征

统计分析渤海表层沉积物中甲藻孢囊的属种组成，计算出甲藻孢囊的优势种及在每个站位的百分含量，并分析优势种的分布特征。根据柱状沉积物中甲藻孢囊的属种组成，计算出优势种在每一层位的含量，并分析优势种的含量变化特征。

#### (2) 渤海甲藻孢囊的丰度

根据样品所用的干样质量、样品的定容量、所用鉴定用量及鉴定甲藻孢囊的粒数，计算出每个样品中甲藻孢囊的丰度。在表层样中分析甲藻孢囊的丰度与海水温度、深度、盐度及沉积物平均粒径的关系。柱状样中分析甲藻孢囊的丰度与沉积物平均粒径的关系。

#### (3) 甲藻孢囊组合与环境因子的探讨

表层沉积物中对鉴定的主要甲藻孢囊属种进行聚类分析和主成分分析，划分

组合并分析所反映的海洋环境特点。柱状沉积物根据甲藻孢囊的优势种在各层位中的变化,讨论渤海 8000 aBP 以来的海水盐度、温度、营养盐及海平面等环境因素的变化过程。

## 1.4 研究现状

### 1.4.1 甲藻孢囊的概念及早期研究历史

甲藻为度过不良环境而形成孢囊,孢囊是许多甲藻生活史的一部分,分为暂时性孢囊和休眠性孢囊<sup>[26]</sup>。暂时性孢囊是由甲藻受外界环境强烈撞击,失去鞭毛形成的内部形态没有明显变化的不动细胞。大部分休眠性孢囊是由有性生殖产生,沉降到水底后需要强制的休眠期<sup>[1]</sup>。甲藻孢囊是生物学分类的名称,沟鞭藻是孢粉学分类的名称<sup>[1,27]</sup>。本文采用统一的生物学分类名称甲藻孢囊。

对甲藻孢囊的早期研究主要集中在形态分类、分布和生活史等方面。19 世纪末 20 世纪初,人们在浮游植物的研究中发现活的甲藻。Evit<sup>[28]</sup>将沉积在沉积物中的甲藻孢囊与水体中的甲藻细胞联系起来,开始了现代真正甲藻孢囊研究。Loebich<sup>[29]</sup>将早期研究的历史过程分为 4 个阶段分别为甲藻孢囊的发现和识别、现代甲藻孢囊的早期观察、化石甲藻孢囊观察和生物学与孢粉学的结合、孢囊术语的重新定义。

### 1.4.2 甲藻孢囊形态分类的研究现状

甲藻孢囊有两类分类系统:一类是从孢囊形态特征上进行分类的孢粉学分类系统,甲藻孢囊的形态特征包括个体的大小、形状、萌发孔的形状、内含物、修饰物、孢囊壁的结构及颜色等,这些特征是我们进行甲藻孢囊分类的重要依据。另一类则是从甲藻细胞形态特征上进行分类的生物学分类系统<sup>[30]</sup>。目前,用于甲藻孢囊鉴定最传统最普遍的方法是用显微镜,根据甲藻孢囊的形态特征观察分类<sup>[31]</sup>。近年来,应用分子生物学方法,从单个或少量甲藻孢囊中提取 DNA,并通过 PCR 扩增应用到甲藻孢囊的分类鉴定中<sup>[32]</sup>。另外,人工神经网络也已应用到对甲藻孢囊图形的自动分类中<sup>[33]</sup>。

对甲藻孢囊进行的各项研究其形态分类是基础,这也是对甲藻孢囊最直接的



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.